

전기장의 국소변화에 따른 전기삼투 유동 및 혼합 특성해석

허형석^{*1}, 정종현¹, 서용권²A STUDY ON CHARACTERISTICS OF ELECTRO-OSMOTIC FLOWS
UNDER THE LOCAL VARIATION OF THE ELECTRIC FIELD

H. S. Heo, J. H. Jeong and Y. K. Suh

In a microfluidic chips pressure driven flow or electro-osmotic flow has been usually employed to deliver bio-samples. Flow in the chips is usually slow and the mixing performance is poor. A micro-mixer with a rapid mixing is important for practical applications. In this study a newly designed and electro-osmotic driven micro-mixer is proposed. This design is comprised of a channel and a series of metal electrodes periodically attached on the side surface. In this configuration electro-osmotic flows and the stirring effects are simulated three-dimensionally using a commercial code, CFD-ACE. Focus is given the effect on the electro-osmotic flow characteristics under the local variation of the electric field.

Key Words: 전기 삼투(Electro-Osmosis), 전기장(Electric Field)

1. 서 론

전기삼투 유동은 MEMS (Microelectro mech anical system) 과 Lab-on-a-chip(LOC)연구에 있어서 마이크로 채널내 용액 및 시료를 운반하는 방법으로 사용되고 있다. 채널 양 끝에 간단히 전극을 두어 전압을 인가함으로써 유체가 구동하게 되는 전기삼투에 의한 운반법이 기존의 압력차에 의한 마이크로 펌프의 구동방법보다 훨씬 더 간단한 기술로 볼 수 있다.

전기삼투(Electroosmotic flow : EOF) 현상은 일반적인 마이크로 채널내에 유체를 채우게 되면 채널 표면의 전자 전하(Electronic charge: -)와 유체의 이온 전하(Ionic charge: +)가 서로 연결되고 이 때 채널 양 끝에 전압을 걸어 주게 되면 유동성이 있는 유체의 이온 전하는 전극을 향해 이동하는 현상이다. 여기서 이온이 서로 연결되고 있는 영역을 전기적 이중층(Electric double layer: EDL)이라 한다. 이 층은 다시 Stern층과 Gouy- Chapman층으로 구성되고 Stern층은 채널표면의 전

자 전하와 강하게 연결되어 거의 움직이지 않는 층이고 Gouy-Chapman층은 유동성을 가지는 층이다. Stern층과 Gouy-Chapman층사이의 경계면을 전단면(Shear plane)이라고 부르고 이곳의 전위를 제타 포텐셜(Zeta potential, ζ)이라고 한다. 이 제타 포텐셜이 전기 삼투 유동을 일으키는 주요인이다. 다음 Helmholtz- Smoulochowski식은 유속과 제타 포텐셜의 관계를 나타낸 것이다.

$$u_{EOF} = \frac{\epsilon \zeta E}{\mu} \quad (1)$$

여기서 μ 는 유속, ϵ 는 전기 유전율, ζ 는 제타 포텐셜, E 는 전기장 그리고 μ 는 점성 계수다[1,2].

기존의 연구로 Molho 등[3]은 일반모세관(유리)내부에 왁스를 부분적으로 코팅한 후 코팅되지 않은 부분의 내부 유속분포를 확인하여 제타 포텐셜의 차이를 확인하였다. Santiago[4]는 전기이중층주변의 유동을 일정한 경계면을 두어 내부와 외부의 무차원 유속을 이론적으로 해석하였다. Hong 등[5]과 Kim 등[6]은 전기삼투 유동을 실험으로 관찰하여 수치해석을 위한 경계조건으로 사용하여 실험결과와 수치해석의 유효성을 확인하였다. Kang 등[7]은 농도가 다른 두 수용액을 "T"형

1 학생회원, 동아대학교 기계공학부

2 정회원, 동아대학교 기계공학부

* Corresponding author E-mail: hsheo@donga.ac.kr

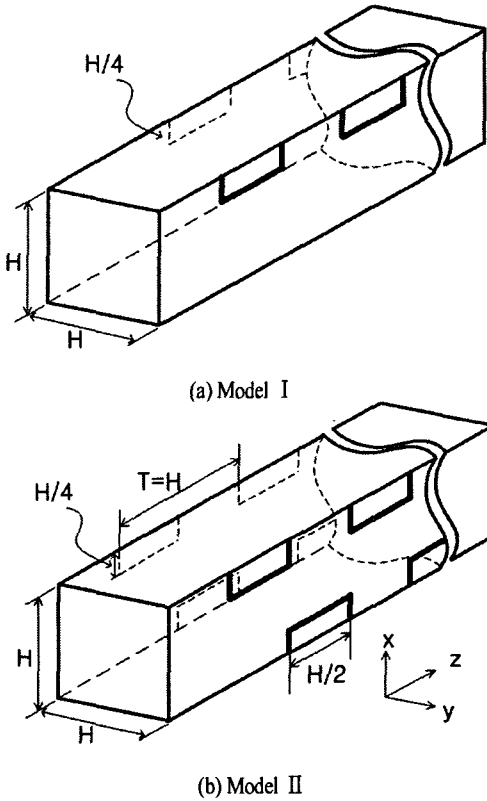


Fig. 1 Perspective view of the flow domain surrounded by a channel with a local metal electrodes on both sides

채널내에서 혼합할 때 강한 와류가 발생하는 것을 수치해석과 실험을 통해서 확인하였다. Kim 등[8]은 마이크로 PIV 기술을 이용하여 전기장의 세기와 EOF 유속 사이의 상관관계를 알아보았다. 기존의 연구들은 유체의 구동에만 관심을 두고 있으며 혼합에 관한 연구는 기초적인 수준이다.

본 연구는 전기삼투유동에서 마이크로 채널내 입의의 전극을 형성하여 전기장을 국소적으로 변경하여 채널내 내부 유동 특성을 분석하고 혼합효과에 대해서 연구하고자 한다.

2. 유동 모델 및 수치해석 기법

2.1 유동 모델

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 해석모델의 형상이다. x, y, z 는 각각 채널의 높이, 폭, 길이방향의 좌표이다. H 는 채널폭 및 채널높이이며, 채널길이는 z -방향으로 임의로 설정된다. 채널 벽면의 양쪽 전극은 길이방향으로 주기적으로 반복되게 하였다. Fig. 1(a)의 Model I은 양쪽 벽면 상단에만

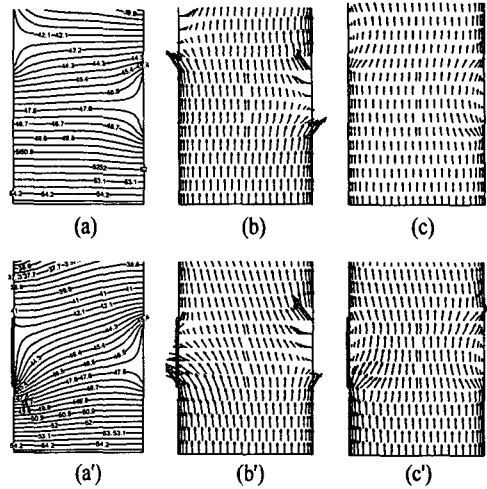


Fig. 2 Electric potential, electric field and velocity distributions; 90 μm height apart from the bottom, Model I: (a), (b), (c), Model II: (a'), (b'), (c')

전극을 두고 서로 엇갈리도록 배열하였고 Fig. 1(b)의 Model II는 벽면 상하단 모두 전극을 두고 하단부분이 반주기 뒤에 설치되었다.

2.2 수치해석 방법

전기삼투와 관련된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \tag{2}$$

$$\rho \frac{D\vec{U}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{U}) + \epsilon K \zeta \nabla \phi \tag{3}$$

여기서 \vec{U} 는 속도 벡터, p 는 압력, ρ 는 밀도, μ 는 점성계수, ϵ 는 전기 유전율, K 는 Debye-Huckel 두께의 역수, ζ 는 제타 포텐셜, ϕ 는 전위이다.

격자수는 25만개의 격자를 형성하였으며 특히 벽면은 제타 포텐셜의 영향을 고려하여 집중격자를 형성하였다.

Fig.1에서 보여준 해석 모델에 대하여 입출구 경계조건으로 입출구의 압력차는 zero이고 전위차는 55V를 사용하였고 벽면경계조건으로 Debye 두께는 $10e-9\text{m}$, Zeta Potential은 -0.1V 로 정의하였고 국소부분의 전위는 5V씩 전위차를 두었다.

본 연구에서 작동 유체는 물을 사용하였으며 밀도는 1000kg/m^3 , 동점성계수는 $10e-6\text{m}^2/\text{s}$, 유전율은 78.5F/m 의 물성치를 정의하였다.

한편, 본 해석을 위하여 보편적인 신뢰성이 입증되어 있는 상용코드(CFX5.7)를 사용하였다.

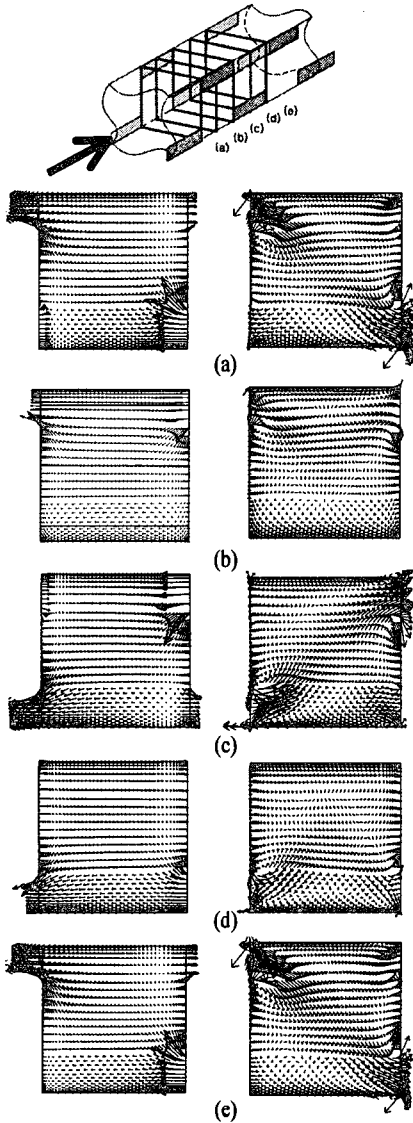


Fig. 3 Sectional view of electric field vectors (left) and velocity vectors(right) in the channel

3. 결과 및 검토

Fig. 2는 Model I, II에 대하여 채널 바닥에서 90 μ m 높이, 입구부분의 전위, 전기장, 속도분포를 보여 주고 있다. 입구에서의 55V의 전압이 출구방향으로 나아가면서 점점 낮아지고 있음을 확인할 수 있다(a), (a'). 이 때 벽면전극 주위의 벽면에서 전기장이 강하게 나타나고 있는 것을 볼 수 있고 벽면전극에서 상대적으로 약한 전기장을 띠고 있음을 볼 수 있다(b), (b'). 속도분포(c), (c')에서는 입구 초기에는 전형적인

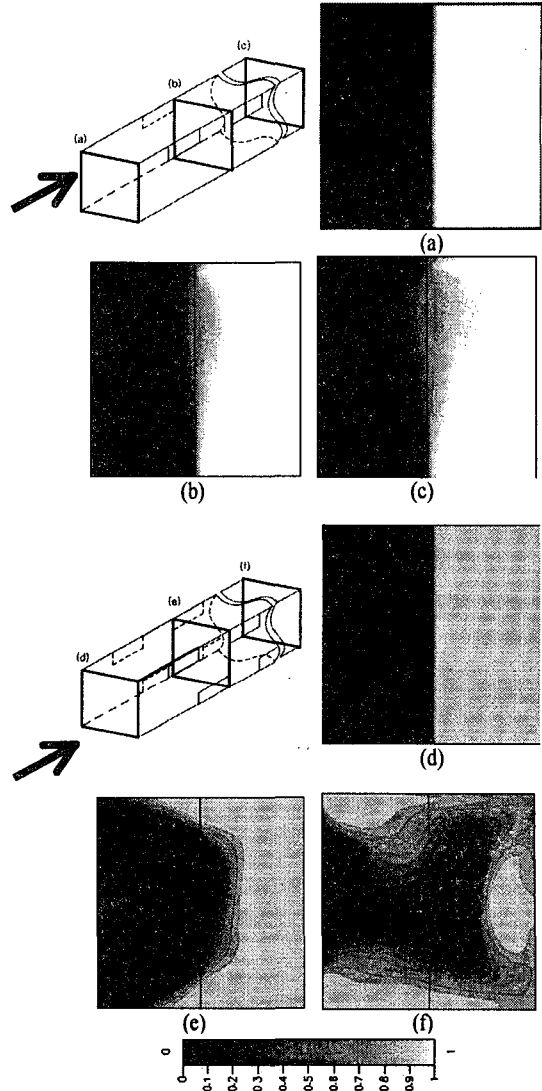


Fig. 4 Dye deformation at each position

Helmholtz Smou lochowski식에 의해 나타난 속도분포를 띠고 있으나 벽면전극에 가까워지면서 속도구배가 나타나고 있다. 이것은 앞서 말한 전기장의 분포가 벽면 전극에서는 상대적으로 낮은 전기장에 의한 것이라고 생각된다.

Fig. 3은 Model II에 대해서 일정한 위치의 수직단면에 대한 전기장과 속도장을 나타내었다. Fig. 3(a)와 (e)의 결과가 비슷한 것은 본 유동이 일정한 주기성을 가지고 있기 때문이다. Fig. 2와 같이 벽면전극의 양 끝단에서 전기장이 발달하고 유속이 강해진다. (a)단면과 같이 좌측상단에서 우측하단방향으로 내려오는 유체는 (b)단면에서상단전극의 영향으로 점점 유속이 감소하다가 (c)단면에서 좌측하단에서 우측하단으로



밀고 우측상단의 유동이 강하게 형성되고 벽면을 타고 내려 오는 유동을 발생시키고 (d)단면에서 한단전극의 영향으로 점점 유속이 감소하다가 (e)단면에서 좌측상단의 전극과 우측 하단전극의 끝에서 유동이 강하게 발생하여 (a)단면과 같은 유동을 발생하게 된다.

Fig. 4는 각각 채널의 입구와 중간 그리고 출구 부분에서의 염료의 거동을 살펴 본 수치해석 결과이다. Fig. 4(a), (b), (c)에서 입구에서 일정하게 반으로 구분된 염료는 벽면 전극이 위치한 상단에서 서로 조금 영향을 미치는 것으로 나타났고 혼합효과는 약하다. 하지만 Fig. 4(d), (e), (f)에서 입구를 지나온 염료가 벽면전극이 있는 채널의 상단과 하단에서 점점 늘어나고 접히고 있는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 마이크로 채널내 측면 전극을 형성하여 국부적으로 전기장 변화에 의해 발생하는 내부 유동의 특성에 대하여 연구하였으며 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 채널 측면 전극에 의한 국부적인 전기장의변화를 주어 유동을 제어할 수 있다.
- (2) 채널 측면 상하단의 전극 변화를 이용하여 내부 유체 유동을 늘이고 접히는 효과를 얻었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Gad-el-Hak, M., 2002, *The MEMS handbook*, CRC Press, New York.
- [2] Kim, H.L. and Hahn, J.H., 2003, "The Need for Visualizing Microflows in Lab-on-a Chip," *KSV J.*, Vol.1, No.1 p.34-37.
- [3] Molho, J.I., Herr, T.W. and Gilvert, J.R., 1998, "Fluid Transport Mechanisms in Microfluidic Devices," (*MEMS ASME IMECE*, Vol.66.
- [4] Santiago, J.G., 2001, "Electroosmotic Flows in Microchannels with Finite Inertial and Pressure Forces," *Anal. Chem.*, Vol.73, No.10, p.2353-2356.
- [5] Hong, S.B., Tang, Djukic, D. and Modi, V., 2001, "Simulation and Experimental Validation of Electro-osmotic Flow in a Microfluidic Channels," *Proc. Int. Conf. of MEMS*, Berkely, California.
- [6] Kim, M.J., Beskok, K. and Kihm, K.D., 2002, "Electro-osmosis-driven Micro-channel Flow: A Comparative Study of Microscopic Particle Image Velocimetry Measurements and Numerical Simulations," *Exp Fluids*, Vol.33 p.170-180.
- [7] Kang, K.H., Shin, S.M. Lee, S.J. and Lang, I.S., 2003, "Visualization of the Two-layered Electroosmotic Flow and its EHD instability in T-channels by micro PIV," *Proc. KSV, Postech*, Pohang, Korea, p.75-78.
- [8] Kim, Y.M. and Lee, S.J., 2003, "Micro PIV Analysis of Electro-osmotic Flow inside Microchannels," *KSV J.*, Vol.1, No.2, p.47-51.